



LABORATOIRE NATIONAL DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS D'HAÏTI  
Delmas 33, Rue Toussaint Louverture # 27, Port-au-Prince, Haïti  
Téléphone : (509) 511 0477 / 510 7880 / 210 1574 à 77  
Courriel : [lnbtp@lnbtp.gouv.ht](mailto:lnbtp@lnbtp.gouv.ht)

## LES METHODES DE RECONNAISSANCE

(Dossier compilé à partir des travaux de : Gilles DUPRE, le Bloc)

Tables des Matières	Page
<b>PREAMBULE</b> .....	<b>2</b>
<b>LES RECONNAISSANCES PAR PUIITS,</b> .....	<b>2</b>
<b>TRANCHEES ET GALERIES</b> .....	<b>2</b>
<b>LES RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES</b> .....	<b>3</b>
I - LA METHODE SISMIQUE .....	3
II – LA METHODE ELECTRIQUE .....	3
<b>LES SONDAGES</b> .....	<b>3</b>
I – SONDAGES ROTATIFS CAROTTES.....	3
II – PRELEVEMENT D’ECHANTILLONS INTACTS.....	5
III – SONDAGES PAR VIBROPERCUSSION .....	5
IV – SONDAGES A LA TARIERE ET AU BATTAGE.....	6
1) Sondages à la tarière .....	6
2) Sondages au battage .....	6
<b>LES ESSAIS « IN SITU»</b> .....	<b>6</b>
I – ESSAI DE CHARGEMENT STATIQUE.....	6
II – SCISSOMETRES .....	7
III – PRESSIOMETRES .....	7
IV – ESSAI STANDARD DE PENETRATION .....	8
V – PENETROMETRES .....	8
Le pénétromètre dynamique .....	8
Le pénétromètre statique.....	9
VI – RHEOTEST .....	9

### **Dossier 3 :**

## **LES METHODES DE RECONNAISSANCE**

### **Préambule**

L'établissement de tout projet de génie civil nécessite une parfaite connaissance du sol de fondation.

Pour cela, il faut déterminer :

- ✓ la nature des couches sur une profondeur suffisante au droit de la zone à construire ;
- ✓ les caractéristiques du terrain, soit en laboratoire sur des échantillons intacts prélevés par sondages, soit «in situ» ;
- ✓ la perméabilité des couches et les caractéristiques de la nappe phréatique (variation de niveau, composition de l'eau).

Avant de choisir les méthodes à utiliser, une première étape s'impose, basée sur :

- ✓ l'étude des cartes géologiques existantes;
- ✓ la recherche des documents établis sur la région;
- ✓ une première reconnaissance rapide du terrain.

Le résultat de cette étude doit permettre à l'ingénieur responsable du projet de déterminer la marche à suivre, d'indiquer si la réalisation est possible sur le site choisi et de donner une approximation du coût des études et des fondations.

Ensuite commence l'étude géotechnique approfondie du terrain permettant de définir parfaitement le type de fondation qui assurera la stabilité générale de l'ouvrage et empêchera les tassements

différentiels pouvant créer la ruine de la construction.

Le déroulement d'une campagne de reconnaissance est toujours progressif et n'est jamais fixé à l'avance avec rigueur: en effet, les procédés dépendent des terrains rencontrés et les problèmes en cours d'essais sont souvent fréquents.

De nombreuses méthodes sont à la disposition du spécialiste:

- ✓ les reconnaissances par puits et tranchées;
- ✓ les reconnaissances géophysiques;
- ✓ les sondages rotatifs, les sondages par poinçonnement ou par vibro-percussion;
- ✓ les sondages destructifs à la tarière ou au battage;
- ✓ les essais «in situ» quand le prélèvement devient très difficile.

### **Les reconnaissances par puits,**

#### **tranchées et galeries**

Cette méthode, la plus ancienne, est celle qui permet le mieux de «voir» les terrains en place et de faire des prélèvements de gros échantillons et des essais directs sur la roche en place.

Les travaux sont réalisés à la main en blindant les parois par des coffrages en bois ou métalliques. A partir des puits on peut creuser des galeries dans les zones les plus dangereuses, en particulier dans les régions qui recèlent de nombreuses carrières.

Si l'on veut atteindre les couches profondes, ces travaux deviennent très chers et sont impossibles dès que l'on rencontre la nappe phréatique. Ils ne sont

utilisés que comme compléments d'autres essais.

### **Les reconnaissances géophysiques**

Ces méthodes présentent l'avantage d'être rapides et assez économiques mais l'interprétation des résultats est très difficile; elles doivent toujours être complétées par des sondages qui permettent de vérifier certaines mesures.

Ces essais indiquent l'épaisseur et l'orientation des couches, la position de la nappe phréatique et la présence d'anomalies géologiques importantes telles que éboulis, surface de glissement, présence de carrières. Ils ne sont utilisés pratiquement que pour les grands ouvrages et donnent surtout des résultats géologiques.

#### **I - La méthode sismique**

Le principe de l'essai est basé sur le fait que les ondes se propagent à des vitesses différentes suivant la nature des couches du terrain : la vitesse croît avec la compacité du sol. L'équipement comprend :

- ✓ un émetteur d'ondes (la plupart du temps l'ébranlement est créé par une explosion);
- ✓ un récepteur (sismographe) associé à un enregistreur mesurant le temps de parcours;

#### **Sismographe**

On suppose que les ondes se propagent en ligne droite dans une couche et ne changent de direction qu'au passage dans une autre couche suivant le principe de la réflexion et de la réfraction.



Les sismographes disposés sur le terrain enregistrent les ondes directes, réfléchies et réfractées. Toutes les mesures permettent de déterminer de façon assez approchée la composition des couches et leur épaisseur. Ces résultats ne donnent jamais une idée très précise du terrain, mais donnent des indications précieuses sur l'emplacement des zones dangereuses où il conviendra d'implanter les sondages.

#### **II – La méthode électrique**

Elle consiste à mesurer la résistivité du sol qui varie suivant la composition des roches et l'importance de l'eau.

Deux électrodes impolarisables envoient dans le sol un courant ; on mesure la différence de potentiel entre deux joints intermédiaires.

La résistivité est alors

déterminée par des abaques établis à partir des résultats expérimentaux.



**Résistivimètre**

Cette méthode donne des indications rapides mais manque de précision.

#### **Les sondages**

La campagne de sondage représente la plus grande partie des études du sol. Sa réussite dépend du choix du matériel, de l'implantation correcte des forages et de la capacité du sondeur.

#### **I – Sondages rotatifs carottés**

Ils sont utilisés pour le prélèvement d'échantillons dans les terrains durs. Leur point faible est le terrain incohérent, dans lequel l'échantillonnage complet est impossible.

##### **1) Principe**

Ces sondages consistent à exécuter un «trou» dans le sol à l'aide d'un tube en

rotation muni à sa base d'un outil coupant (couronne) et à remonter ensuite avec précautions des échantillons (carottes) les moins remaniés possible pour l'étude en laboratoire.

## 2) Le matériel

### a) Le train de tiges

Par l'intermédiaire d'un train de tiges, la machine transmet à l'outil:

- ✓ un effort de poussée vertical;
- ✓ un couple de rotation.

Il est formé d'éléments de 2 à 3 m de longueur permettant de descendre à de grandes profondeurs.

Il existe deux procédés:

- ✓ la rotation est transmise à une broche polygonale coulissante entraînant les tiges; la pression verticale, manuelle, mécanique ou hydraulique s'exerce sur cette broche;
- ✓ le moteur ou un renvoi actionne directement les tiges; la poussée s'exerce sur le moteur ou le renvoi qui peuvent coulisser sur une glissière.

### b) Le carottier

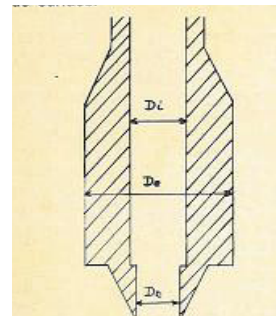
C'est l'élément important car la qualité du sondage et des échantillons dépend en grande partie de lui. Il en existe de nombreuses sortes.

Dans les carottiers simples l'échantillon est en contact direct avec le tube perforateur.

Pour éviter que la carotte ne soit en contact avec la partie mobile et ne soit détériorée par l'eau de perforation on utilise un carottier double qui possède un tube

intérieur recevant la carotte dès son entrée dans l'appareil. Ils donnent d'excellents résultats pour les roches homogènes, quelque soit leur dureté, mais, pour des argiles compactes et des terrains hétérogènes, seuls les carottiers triples donnent satisfaction.

Les caractéristiques géométriques du carottier définissent le jeu et l'indice de surface.



**Schéma d'un carottier**

De = Diamètre extérieur du carottier

Di = Diamètre intérieur du carottier

Dt = Diamètre intérieur de la tresse coupante.

Le jeu  $j = \frac{Di - Dt}{Dt}$  doit être inférieur à 1,5%.

L'indice de surface  $ls = \frac{De^2 - Dt^2}{Dt^2}$  doit être inférieur à 15% pour les terrains durs et à 8% pour les terrains très sensibles.

### c) La couronne

Elle est composée d'un matériau dur (généralement en diamant); il est très important de la choisir en fonction du terrain pour éviter une usure prématurée et obtenir un bon rendement; il peut même être avantageux de changer de couronne en cours de forage.

Pour empêcher un échauffement trop important, l'outil doit être refroidi par un

fluide qui est soit de l'eau, soit de l'air; ce fluide a, d'autre part, le rôle d'évacuer jusqu'à l'orifice les débris qui se forment autour de l'outil de découpage. L'utilisation de l'air, plus récente, n'est valable que pour terrains de faible dureté.

L'eau a l'inconvénient de désagréger les terrains peu cohérents: les carottes sont alors remaniées. Pour éviter cela, l'eau est additionnée d'argile (bentonite): les échantillons ont un meilleur aspect et la désagrégation des roches est moins importante.

La circulation du fluide est assurée dans le train de tiges creux par une pompe ou un compresseur.

### 3) Les résultats

Les échantillons recueillis par le carottier prennent place dans une caisse à carotte dès leur remontée à leur surface. Les échantillons intacts destinés aux essais en laboratoire seront enveloppés pour éviter une altération pendant le transport. Le sondeur doit indiquer clairement toutes les indications nécessaires: le numéro du sondage, les coordonnées du lieu de forage, le mode d'exécution, les caractéristiques de l'appareil, la profondeur de tous les éléments prélevés et le pourcentage de carottage à cause du remaniement toujours possible (c'est le rapport de la longueur de la carotte sur la longueur du trou de forage). De plus, une coupe du terrain sera exécutée, regroupant les différentes observations effectuées pendant l'opération: vitesse de forage, zones d'éboulements, vides ou carrières, passages de perte en eau, niveau de la nappe, résultats d'essais géotechniques «in situ».

## ***II – Prélèvement d'échantillons intacts***

Pour les terrains meubles le prélèvement d'échantillons intacts s'effectue avec des

tubes à paroi mince enfoncés sans rotation dans le sol.

Cette méthode est cependant limitée aux terrains ne contenant pas d'éléments durs, caillouteux, difficilement coupés par poinçonnement.

L'appareil à paroi mince, enfoncé par battage, est utilisé pour les sols compacts (argiles dures, marnes) et l'appareil à piston pour les couches plastiques (vases, argiles sableuses).

Pour éviter un remaniement, les carottes sont conservées dans leur gaine d'origine:

- ✓ soit dans le tube à paroi mince;
- ✓ soit dans la gaine intérieure d'un tube à double paroi.

## ***III – Sondages par vibropercussion***

Cette méthode, récente, mise au point par l'entreprise Bachy, permet d'obtenir une reconnaissance beaucoup plus précise des alluvions pulvérulentes, des argiles ou des marnes tendres par forage au battage.

### 1) Principe

Le principe de cette méthode consiste à enfoncer dans le terrain au-dessous du pied de tubage un tube échantillonneur ayant les dimensions des carottiers classiques de façon à prélever une carotte parfaitement représentative bien que remaniée par effet de parois.

Le fonçage se fait par percussion à l'air comprimé, à l'aide d'un marteau «fond de trou». La colonne de soutènement est descendue par battage au fur et à mesure de la progression de l'échantillonneur.

### 2) Les échantillons

Ils sont prélevés sous gaine plastique; pour cela le carottier est muni d'une gaine inférieure qui permet de recueillir les

terrains dans un emballage pouvant être envoyé directement au laboratoire qui effectue les essais; il est possible de faire des analyses granulométriques, sous réserve d'estimation en ce qui concerne les éléments les plus gros qui auraient pu être découpés ou cassés par le sabot de l'échantillonneur.

#### ***IV – Sondages à la tarière et au battage***

Ces méthodes ne fournissent pas de carottes mais des débris (ou «cuttings») remontés à la surface avec la boue de forage. Elles viennent en général en complément des sondages rotatifs carottés. Les avantages reposent sur leur rapidité d'exécution, leur économie et l'utilisation de diamètres plus gros.

##### ***1) Sondages à la tarière***

Ils sont utilisés dans les terrains meubles ou peu résistants dépourvus de gros éléments rocheux.

La tarière est une vrille montée sur une machine du type sondeuse rotative avec tête d'entraînement mobile sur glissière qui transmet une vitesse de rotation faible et un couple élevé.

C'est une méthode très rapide et économique qui donne une bonne idée de l'épaisseur des couches traversées par examen des débris remontés.

Ce sondage, souvent couplé à un sondage carotté, permet de traverser rapidement les couches correspondant au futur terrassement avant d'atteindre le terrain à étudier où l'on veut exécuter des prélèvements d'échantillons intacts.

##### ***2) Sondages au battage***

Les machines de battage légères sont constituées d'un cabestan sur lequel le sondeur enroule un câble avec lequel il imprime des mouvements alternatifs au trépan. Après avoir battu pendant un

moment on évacue les débris à l'aide d'une soupape.

En général le sondage est systématiquement revêtu d'un tubage métallique qui est foncé par battage.

Cet équipement peut être monté sur une sondeuse rotative pour obtenir une machine mixte de rotation-battage.

#### **Les essais « in situ »**

Le but de ces essais est de compléter ou même de remplacer les essais sur échantillons intacts en laboratoire pour déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques des sols. Ils sont surtout utilisés dans les terrains très hétérogènes ou très incohérents quand les carottes prélevées sont trop remaniées.

#### **I – Essai de chargement statique**

L'essai de chargement statique consiste à exercer une compression croissante au moyen d'un vérin sur une surface de 10 x 10 cm à 40 x 40 cm par l'intermédiaire d'une table de chargement et à mesurer les déformations avec un flexigraphe enregistreur. Il doit être effectué en principe à la profondeur prévue pour les fondations futures.

Cet essai présente un intérêt dans le cas de sols pulvérulents à granulométrie grossière ou dans le cas de sols stratifiés dans lesquels tout prélèvement d'échantillons intacts n'a qu'une valeur ponctuelle.

L'interprétation des résultats doit se faire avec beaucoup de prudence car l'étude n'intéresse qu'une profondeur et une superficie très faible du terrain. L'essai peut tout au plus donner un ordre de grandeur du module de déformation dans le cas d'un sol homogène sur une grande épaisseur mais les valeurs du taux de travail admissible sont souvent très

éloignés de la réalité. Il ne peut en aucun cas permettre un calcul des tassements et il est sans valeur dans les sols argileux.

## **II – Scissomètres**

L'essai au scissomètre (ou vanetest) n'est utilisé que dans les argiles molles pour déterminer leur cohésion et calculer la résistance au cisaillement. Il consiste à mesurer le couple de torsion nécessaire pour faire tourner autour de son axe un cylindre de terrain immobilisé par enfoncement dans le sol d'un système à ailettes. L'enfoncement est exécuté par battage au moyen d'un mouton léger (50 à 60 kg). On fait tourner les ailettes d'un quart de tour en agissant sur le bras du levier où s'applique l'effort et celui qui est solidaire, par l'intermédiaire de l'axe central, des ailettes.

## **III – Pressiomètres**

Cet appareil, constitué d'une sonde cylindrique, expansible latéralement, est introduit dans un sondage et permet de mesurer les déformations de la paroi sous l'effet d'une pression variable. De la courbe effort-déformation on déduit, par calculs, les caractéristiques du sol étudié qui permettent d'établir le taux de travail du sol sous semelles, la force portante des puits et pieux et d'évaluer les tassements absolus et différentiels.

A partir des essais pressiométriques on peut également traiter les problèmes de poussée et butée contre les murs de soutènement, de résistance des plaques et tirants d'ancrage, de stabilité des talus et glissements de terrains.

La rapidité d'exécution et d'interprétation permet de fournir très vite des résultats. Les interventions peuvent avoir lieu en cours de travaux quand un problème se pose ou simplement pour vérifier le taux de travail du sol en fond de fouille.

Les essais pressiométriques ne sont pas toujours suffisants pour reconnaître

complètement un site donné mais constituent un moyen complémentaire, très efficace et économique, aux sondages carottés.

### **1) Principe**

L'essai est réalisé dans un forage exécuté au préalable en petit diamètre (environ 60 mm) et intéresse une hauteur de 0,50 m environ; dans un même sondage on effectue plusieurs mesures à différentes profondeurs.

Pour obtenir de bons résultats, il faut s'assurer du non-remaniement de la paroi du forage; pour cela les méthodes de sondages utilisées doivent être adaptées au terrain. Pour consolider les parois il est même possible de faire des injections de bentonite. Dans ce forage on descend alors une sonde constituée par un cylindre métallique enveloppé d'une gaine élastique. Un réservoir d'eau placé en surface assure le remplissage entre la paroi métallique intérieure, fixe, et la gaine extérieure déformable. Le volume d'eau constant est mis en pression au moyen de gaz comprimé; la gaine élastique de la sonde se dilate et exerce un champ cylindrique de contraintes sur la paroi. Un manomètre indique la pression, et l'abaissement de volume dans le réservoir mesure le volume de déformation.

Dans le pressiomètre de M.L. Ménard la sonde comprend, de part et d'autre de la cellule principale, deux autres cellules (dites de garde) gonflées au gaz comprimé à la même pression, pour réduire l'influence des vides du forage et rendre le champ de contrainte plus uniforme.

### **2) Résultats**

Les différentes mesures de l'essai permettent de tracer la courbe des déformations en fonction de la pression qui met en évidence trois phases:

- ✓ La phase de recompaction de la paroi qui avait subi une certaine décomposition pendant le forage;
- ✓ La phase pseudo-élastique: les déformations varient à peu près linéairement avec la pression; la pression de la courbe donne le module de déformation E;
- ✓ La phase plastique: à partir de la pression de fluage  $P_f$  la courbe devient exponentielle en raison de la désagrégation du sol. La pression ne peut dépasser une valeur asymptotique  $P_l$  appelée pression limite qui est une caractéristique intrinsèque du sol.

Nbre. De coups	Densité relative
0 à 4	Très inconsistant
4 à 10	Inconsistant
10 à 30	Moyen
30 à 50	Compact
Au-dessus de 50	Très compact

Il est aussi possible d'établir une correspondance entre le nombre de coups et la compacité des argiles.

Par contre, dans les sols sablo-graveleux, cet essai n'est pas valable à cause de la présence de gros éléments qui perturbent les résultats.

Cette méthode peut apporter une aide précieuse et peu onéreuse au début d'une campagne de reconnaissance en permettant d'orienter judicieusement l'implantation de prélèvements d'échantillons intacts pour le calcul de la force portante du sol.

#### IV – Essai standard de pénétration

##### 1 )Principe

L'essai S.P.T. (Standard Penetration Test), normalisé par Terzaghi, consiste à enfoncer par battage un carottier bien défini dans la couche à étudier. Il est d'abord enfoncé de 15 cm puis on compte le nombre de coups nécessaires à un enfoncement supplémentaire de 30 cm; le mouton qui sert à battre pèse 63,5 kg et sa hauteur de chute est de 76 cm. Le carottier utilisé a pour caractéristiques:

- ✓ Longueur totale: 789 mm,
- ✓ Diamètre extérieur : 51 mm,
- ✓ Diamètre intérieur : 34 mm.

##### 2)Résultats

L'enfoncement dépend de la cohésion et de l'angle de frottement interne mais il est très difficile de déduire ces caractéristiques des mesures. Cependant, il est possible de classer les terrains suivant leur densité relative. Ainsi Terzaghi et Peck indiquent pour les sables:

#### V – Pénétrromètres

Ces appareils sont constitués d'une tige métallique enfoncée dans le sol par battage ou vérin pour mesurer la résistance à l'enfoncement en fonction de la profondeur.

Il existe deux sortes de pénétrromètres:

##### Le pénétrromètre dynamique

L'essai au pénétrromètre dynamique consiste à faire pénétrer dans le sol, par battage, des tiges métalliques à l'aide d'un mouton tombant en chute libre. Il est conçu pour donner un ordre de grandeur de la résistance du terrain entre 0 et 2 m de profondeur. Les résultats des essais sont représentés par des graphiques donnant en fonction de la profondeur atteinte par la pointe (en forme de cône) de l'appareil:



- ✓ soit le nombre de coups N, correspondant à un enfoncement de 25 cm (la résistance est proportionnelle au nombre de coups),
- ✓ soit la résistance en bars déduite de la formule dite des Hollandais avec un coefficient de sécurité de 1.

Les renseignements fournis sont très intéressants du point de vue qualitatif.

La rapidité d'exécution, la facilité de mise en œuvre permettent de multiplier à peu de frais l'investigation de grandes surfaces en multipliant le nombre d'essais et de vérifier, très facilement, par corrélation, la variation des caractéristiques d'un sol d'un point à un autre de la fondation.

Dans le cas de terrains non cohérents, par application de la formule des quantités de mouvements aux résultats classiques de la mécanique des sols, il est possible de caractériser le terrain rencontré.

Dans le cas de terrains sablo-argileux ou argileux, il est plus difficile de donner une correspondance directe.

Comme le S.P.T., l'essai au pénétromètre dynamique ne peut se substituer aux essais en laboratoire et aux sondages mécaniques mais permet de donner des renseignements très utiles et peu onéreux.

#### Le pénétromètre statique

C'est un appareil plus précis et plus fidèle. Il mesure au cours de la pénétration en profondeur d'une barre terminée par un cône l'effort de pointe correspondant à la résistance du sol au poinçonnement et l'effort de frottement latéral. Ces deux caractéristiques permettent de déterminer la force portante du sol à différentes profondeurs et de choisir le mode de fondation. Il existe de nombreux types de pénétromètres de conception analogue, ne différant que par quelques détails.

Le pénétromètre «Sol-Essais», mis au point par M. Parez, comporte une pointe contenant un vérin hydraulique dont le piston se termine par un cône qui reçoit à la pénétration l'effort de pointe. La pression de l'huile est lue en surface sur un manomètre.

L'appareil est enfoncé dans le sol par un vérin de fonçage dont l'effort est lu sur un autre manomètre.

La valeur du frottement latéral est obtenue par différence entre l'effort total de fonçage et l'effort de pointe.

Le vérin permet également l'arrachage du pénétromètre et la mesure de cet effort.

Ce système donne, sans interruption du fonçage, une lecture directe et continue des efforts.

Les résultats sont traduits sur un graphique comportant trois courbes.

D'après ces mesures on peut déterminer le niveau optima à prendre en compte pour les fondations et la charge portante des pieux et puits. Notons enfin qu'il existe des pénétromètres dynamiques statiques combinant les deux principes.

#### **VI – Rhéotest**

Le rhéotest, mis au point par M. Biarez, est un appareil destiné à mesurer les propriétés mécaniques du sol en place: il consiste à cisailer le terrain comme le scissomètre mais permet en plus de connaître la composante normale de la contrainte sur la surface du cisaillement.

L'appareil est composé d'un tube creux de 8 à 10 cm de long; à la partie basse se trouve une enveloppe cylindrique de caoutchouc armé que l'on gonfle pour appliquer la pression normale choisie sur le sol.

Le rhéotest est enfoncé comme un carottier dans le fond des sondages.

Le couple de rotation est mesuré par une clé dynamométrique. On peut étudier

simultanément la variation de volume pendant le cisaillement et diverses relations entre les contraintes et les déformations. L'appareil permet en outre de prélever un échantillon de sol dans la zone où la mesure a été faite.

Il est utilisable dans tous les sols moyens ou médiocres et peut donner immédiatement sur le chantier l'angle de frottement interne et la cohésion. Il existe de nombreux autres essais tels que les essais piézométriques pour observer les variations de la nappe phréatique, les essais de perméabilité et de fissuration, les essais par méthodes radioactives pour la détermination de la teneur en eau ou de la densité des sols.

**L'étude des sols, longtemps considérée comme secondaire, est maintenant reconnue comme nécessaire dans l'élaboration de tout projet. L'utilisation judicieuse des différents moyens de reconnaissance suivant les caractéristiques recherchées, permet de déterminer le système de fondation le plus approprié, donc le moins onéreux.**

(Référence : Gilles DUPRE, le Bloc)